

Аэрокосмический научный журнал

Сетевое научное издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана
<http://aerospjournal.ru>

Ссылка на статью:

// Аэрокосмический научный журнал.

МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017.

№ 02. С. 1–16.

DOI: **10.24108/aersp.0217.0000062**

Представлена в редакцию: 14.03.2017

Исправлена: 28.03.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 621.438

Конверсия авиационного турбореактивного двухконтурного двигателя в установку для выработки пиковой электроэнергии

Шафиков Г.А.^{1,*}, Моляков В.Д.¹

[*88347@mail.ru](mailto:88347@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе рассмотрена конверсия турбореактивного двухконтурного трёхвального двигателя с форсажной камерой (ТРДДФ), отработавшего нормативный срок службы и прошедшего капитальный ремонт, в установку для выработки пиковой или кратковременно используемой электроэнергии. Рассматриваемая концепция использования авиационных двигателей актуальна в рамках программы по освоению северных районов России, где нет возможности подключения к электросетям. Конверсия заключается в удалении форсажной камеры, блока реактивных сопел; установке камеры подогрева, свободной турбины и диффузора с выхлопным устройством. Для нахождения параметров установки был выполнен расчёт, в котором за исходные данные были приняты: температура газа перед турбиной 1530 К (температура газа перед турбиной снижена на 100 К для продления срока службы двигателя, поэтому изначально температура газа перед турбиной составляла 1630 К); расход воздуха 364 кг/с; степень двухконтурности 1,36 (отношение расхода воздуха во втором контуре к расходу воздуха в первом контуре). В результате этого расчёта получено, что энергетическая установка, укомплектованная из конвертированного двигателя и электрогенератора, обладает электрической мощностью 77,3 МВт и КПД 27,8 %. Дополнительно проанализировано влияние введения камеры подогрева во втором контуре на параметры двигателя и произведена оценка срока службы свободной турбины.

Ключевые слова: конверсия двигателя, турбореактивный двухконтурный двигатель с форсажной камерой, пиковая электроэнергия, автономная энергоустановка

Введение

Разработанная в России программа по специальному освоению северных территорий нуждается в быстром введении пиковых мощностей для выработки электроэнергии. Потребители в северных областях по той или иной причине не имеют доступа к электрическим сетям. Для покрытия собственных нужд они используют автономные [1] энергетические машины – поршневые, газотурбинные установки открытого и замкнутого цикла [2,3], газотурбинные двигатели усовершенствованных циклов [4] приспособленные под выра-

ботку электроэнергии [5] и нетрадиционные энергоустановки [6]. Но может возникнуть ситуация с нехваткой электроэнергии от базовых источников питания – в таком случае необходимо оперативно ввести дополнительный источник энергии [7].

В случае возникновения потребности в дополнительном источнике электроэнергии на военном объекте, имеющем аэродром, возможно решить данную проблему при помощи резервных энергетических машин – авиационных двигателей, отработавших свой нормативный ресурс и прошедших капитальный ремонт. Для этого необходимо произвести конверсию двигателя под энергетическую установку

В область применения конверсированного двигателя входит не только выработка электроэнергии, но привод насосных станций магистральных нефтепроводов [8] так как в компрессорных станциях предпочтительнее использовать газотурбинный привод, нежели электропривод [9,10].

В северных районах нашей страны для автономной энергетики, в том числе и для конверсированных двигателей, предпочтительным является использование традиционных жидкого или газообразного топлива. Переходить на использование альтернативных видов топлива (такие как биодизель, биогаз, водород и т.п.) не целесообразно из-за их высокой стоимости [11], сложности синтеза и доставки [12]. Исключением является топливо, полученное газификацией твёрдых бытовых [13,14] и промышленных отходов [15], которые необходимо утилизировать для сохранения природы наших территорий.

Конверсия ТРДДФ

Приспособление авиационных двигателей под выработку электроэнергии актуально и позволяет с минимальными техническими доработками и за короткий срок приспособить модуль авиационного двигателя в состав энергетической установки.

Обычно используется модуль газогенератора от двухконтурного авиационного двигателя, или со снятым вентилятором, подключая вал ротора доработанной турбины привода вентилятора к электрогенератору, или «срезают» лопатки вентилятора наружного контура, дорабатывают турбину вентилятора, и подключают такой модуль к вновь разработанной свободной турбине привода электрогенератора. По таким схемам серийно выпускаются энергетические установки. Для примера можно привести энергетическую установку НК-37СТ (рис. 1) и газотурбинный двигатель НК-361 для газотурбовоза ГТ1h, которые состоят из двух основных частей: газогенератора и свободной турбины. Двигатель НК-37СТ, трехвальный, имеет пятнадцатиступенчатый компрессор, четырехступенчатую турбину, кольцевую камеру сгорания. Оболочки внешнего контура образуют защитный кожух, куда направляется часть воздуха, сжатого во внутреннем контуре, с целью снижения температуры наружной поверхности двигателя.

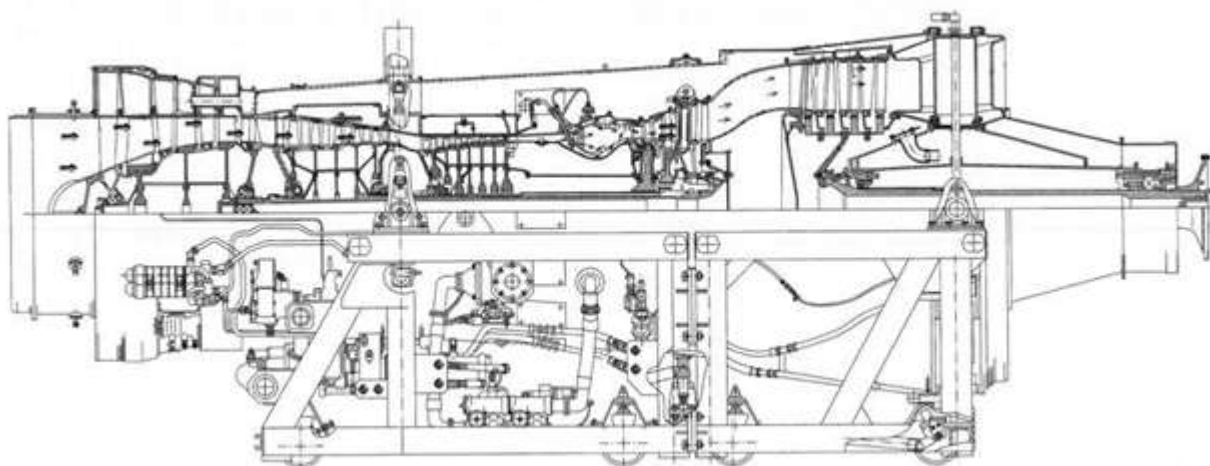


Рис. 1. НК-37СТ

В данной работе за исходный авиационный двигатель принят трёхвальный ТРДД (рис. 2) с форсажной камерой (ФК), расположенной во втором контуре. Модуль повышения давления состоит из трёх компрессоров: трёхступенчатый вентилятор (Вл), пятиступенчатый компрессор низкого давления (КНД) и семиступенчатый компрессор высокого давления (КВД). Камера сгорания (КС) кольцевая многофорсуночная. Модуль турбин имеет одноступенчатую турбину высокого давления (ТВД), одноступенчатую турбину низкого давления (ТНД) и двухступенчатую турбину вентилятора (ТВл).

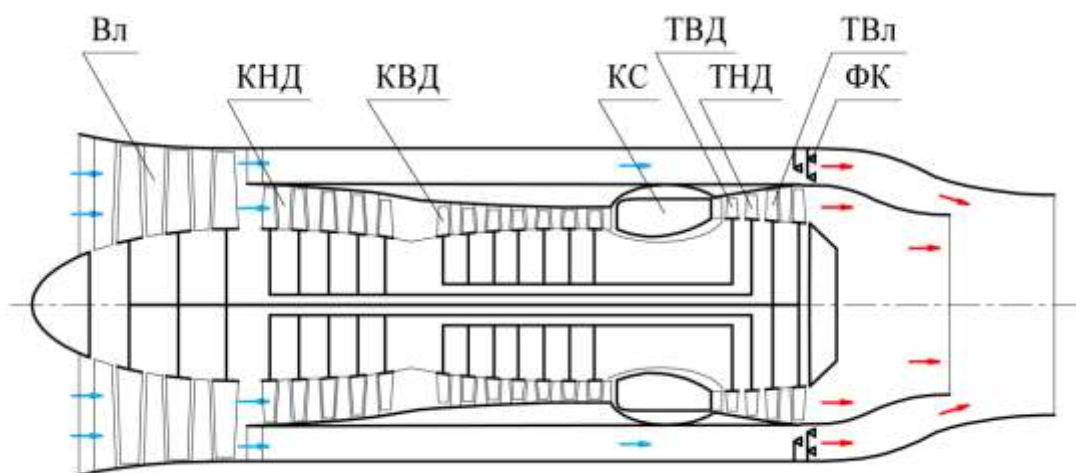


Рис. 2. Принципиальная схема используемого ТРДД с форсажной камерой

Из двигателя удаляется блок реактивных сопел и форсажная камера. Далее рассматривается трёхвальная энергоустановка с двумя контурами. Режим работы двигателя соответствует взлётному режиму, при котором температура газа перед турбиной принимается равной 1530 К (для продления срока службы двигателя температура газа перед турбиной

снижена с 1630 К на 100 К); расход воздуха 364 кг/с; степень двухконтурности 1,36 (отношение расхода воздуха во втором контуре к расходу воздуха в первом контуре).

В конверсированном двигателе потоки из 1-го и 2-го контуров поступают на свободную турбину. Для того чтобы повысить электрическую мощность двигателя и не усложнять конструкцию наличием смесительной камеры, на выходе из 2-го контура устанавливается камера подогрева, нагревающая воздух второго контура до температуры $T_{\text{КП}}^* = 967$ К равной температуре за турбиной привода вентилятора $T_{\text{ТВЛ}}^* = 967$ К. Это позволяет выровнять распределение полных давления и температуры в сечении перед свободной турбиной и использовать короткий переходник между модулем газогенератора и свободной турбиной, снижающий потери полного давления. В качестве нагрузки был выбран электрогенератор переменного тока марки ТЗФП-80-2У3

Процесс преобразования ТРДДФ под установку для выработки пиковой электроэнергии состоит из следующих этапов:

1. Демонтаж блока сопел двигателя и форсажной камеры;
2. Установка камеры подогрева (КП) на выходе из внешнего контура;
3. Установка свободной турбины (ТС), рассчитанной на частоту равную частоте электрогенератора (ЭГ);
4. Присоединение диффузора (Д) с выхлопным устройством к свободной турбине;
5. Соединение выходного вала свободной турбины с валом электрогенератора при помощи муфты (Мф).

После технических доработок получается газотурбинная установка, принципиальная схема которой представлена на рисунке 3.

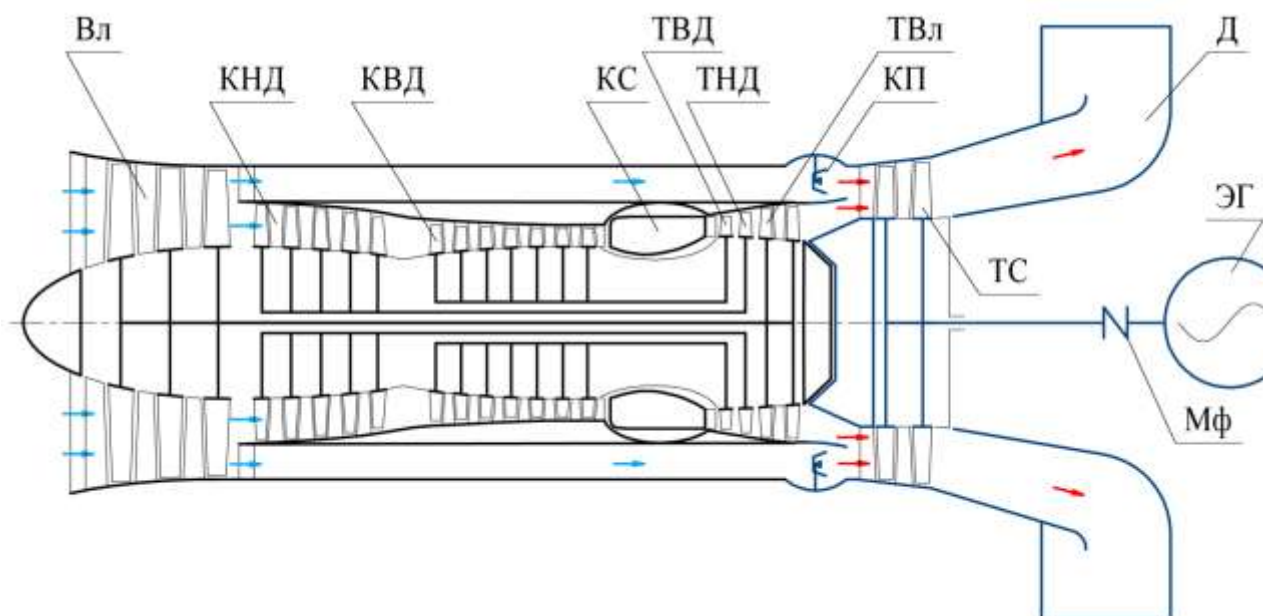


Рис. 3. Принципиальная схема газотурбинной установки на основе модуля газогенератора двухконтурного ТРДДФ

В результате расчёта параметров ГТУ [16] были получены зависимости удельного расхода топлива и удельной мощности установки от степени повышения полного давления, которые представлены на рисунке 4.

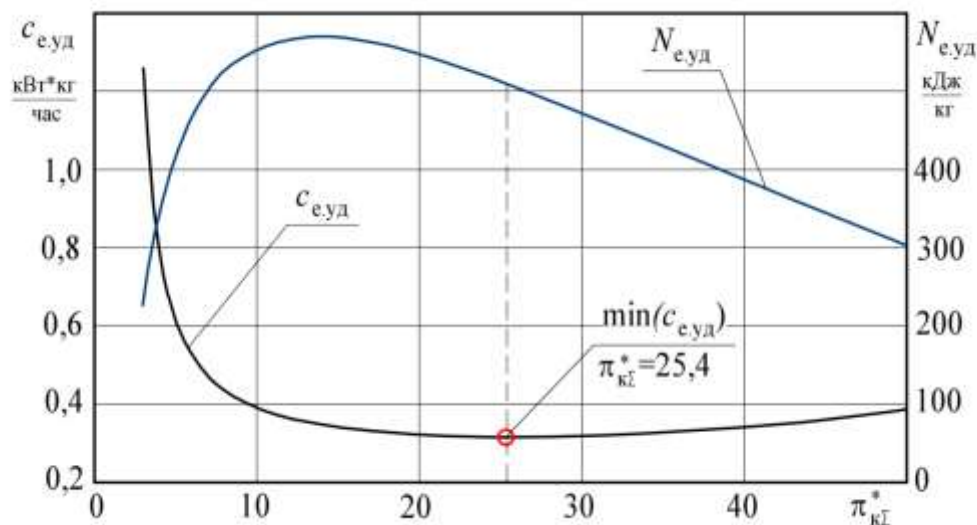


Рис. 4. Удельный расход топлива и удельная мощность установки в зависимости от степени повышения полного давления в компрессорах внутреннего контура ТРДД

Номенклатура таких двигателей имеет полную степень повышения давления $\pi_{к*} = 20..30$ [17]. Степень повышения полного давления выбрана $\pi_{к*} = 25,4$, при которой удельный расход топлива минимален. Полная температура газа после турбины вентилятора $T_{ТВЛ}^* = 967$ К, полная температура воздуха на входе в камеру подогрева $T_{вх.кп}^* = 402$ К.

Степень понижения давления в свободной турбине:

$$\pi_{ТС} = \frac{\pi_{к*} \sigma_{вх} \sigma_{КС} \sigma_{П} \sigma_{вых}}{\pi_{ТВД}^* \pi_{ТНД}^* \pi_{ТВЛ}^*} = 2,78,$$

где $\sigma_{вх}$, $\sigma_{КС}$, $\sigma_{П}$, $\sigma_{вых}$, – коэффициенты сохранения полного давления во входном устройстве, камере сгорания, переходнике, выходном устройстве соответственно; $\pi_{ТВД}^*$, $\pi_{ТНД}^*$, $\pi_{ТВЛ}^*$ – степени понижения полного давления в ТВД, ТНД, ТВЛ соответственно.

Изоэнтروпная температура газа после свободной турбины:

$$T_{ТС} = T_{ТВЛ}^* \cdot \pi_{ТС}^{\frac{1-k_{i.г}}{k_{i.г}}} = 746 \text{ К},$$

где $k_{i.г}$ – истинный показатель изоэнтروпы газа.

Удельная теоретическая работа свободной турбины:

$$H_{ТС} = c_{pm.г} T_{ТВЛ}^* - c_{pm.г} T_{ТС} = 253,9 \frac{кДж}{кг},$$

где $c_{pm.г}$ – средняя удельная теплоёмкость газа при соответствующей температуре.

Удельная работа свободной турбины:

$$L_{\text{ТС}} = H_{\text{ТС}} \eta_{\text{Л.ТС}} - \frac{c_{\text{ТС}}^2}{2} = 213,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где $\eta_{\text{Л.ТС}}$ – лопаточный КПД свободной турбины; $c_{\text{ТС}}$ – скорость потока на выходе из свободной турбины.

Полная температура газа после свободной турбины находится из формулы:

$$L_{\text{ТС}} = c_{\text{рм.г}} T_{\text{ТВЛ}}^* - c_{\text{рм.г}} T_{\text{ТС}}^*,$$

$$T_{\text{ТС}}^* = 782 \text{ К}.$$

Относительный расход топлива в основной камере сгорания:

$$g_{\text{топл}}^I = \frac{c_{\text{рм.г}} T_{\text{Г}}^* - c_{\text{рм.в}} T_{\text{К}}^*}{Q_{\text{Н}}^{\text{р}} \eta_{\text{Г}}^I - (c_{\text{рм.г}} T_{\text{Г}}^* - c_{\text{рм.г}} T_0)} = 0,022,$$

где $T_{\text{Г}}^*$ – температура газа перед ТВД; $T_{\text{К}}^*$ – температура воздуха после блока компрессоров, 797 К; $c_{\text{рм.в}}$ – средняя удельная теплоёмкость воздуха при соответствующей температуре; $Q_{\text{Н}}^{\text{р}}$ – низшая рабочая теплота сгорания топлива; T_0 – температура определения величины $Q_{\text{Н}}^{\text{р}}$; $\eta_{\text{Г}}^I$ – коэффициент полноты сгорания топлива;

Относительный расход топлива в камере подогрева:

$$g_{\text{топл}}^{II} = \frac{c_{\text{рм.г}} T_{\text{ТВЛ}}^* - c_{\text{рм.в}} T_{\text{ВХ.КП}}^*}{Q_{\text{Н}}^{\text{р}} \eta_{\text{Г}}^{II} - (c_{\text{рм.г}} T_{\text{ТВЛ}}^* - c_{\text{рм.г}} T_0)} = 0,015,$$

где $\eta_{\text{Г}}^{II}$ – коэффициент полноты сгорания топлива;

Удельная полезная мощность двигателя, отнесённая к 1 кг воздуха 1-го контура:

$$N_{\text{е.уд}}^{G_I} = (g_{\text{ТВЛ}} + g_{\text{КП}}) L_{\text{Т.с}} \eta_{\text{м}} = 509,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где $g_{\text{ТВЛ}} = [(1 + g_{\text{топл}}^I)(1 - g_{\text{ут}} - g_{\text{охл}}) + g_{\text{возв}}]$ – относительный расход газа за турбиной вентилятора; $g_{\text{КП}} = m(1 + g_{\text{топл}}^{II})(1 - g_{\text{ут}})$ – относительный расход газа за камерой подогрева; $\eta_{\text{м}}$ – механический КПД;

Полезная мощность двигателя:

$$N_{\text{е}} = G_I N_{\text{е.уд}}^{G_I} = 78,5 \text{ МВт},$$

где G_I – расход воздуха в 1-м контуре.

Удельный расход топлива в основной камере сгорания:

$$c_{\text{е.уд}}^I = \frac{g_{\text{топл}}^I * G_I}{N_{\text{е}}} = 0,154 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} * \text{час}}.$$

Удельный расход топлива в камере подогрева:

$$c_{\text{е.уд}}^{II} = \frac{g_{\text{топл}}^{II} m G_I}{N_{\text{е}}} = 0,142 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} * \text{час}}.$$

Суммарный удельный расход топлива двигателя:

$$c_{\text{е.уд}} = c_{\text{е.уд}}^I + c_{\text{е.уд}}^{II} = 0,296 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} * \text{час}}.$$

Для полученного значения мощности $N_{\text{е}} = 78,5 \text{ МВт}$ подобран электрогенератор переменного тока ТЗФП-80-2УЗ, который обладает КПД равным $\eta_{\text{эг}} = 98,3 \%$.

Электрическая мощность установки:

$$N_{\text{уст}} = N_e \eta_{\text{эг}} = 77,3 \text{ МВт},$$

где $\eta_{\text{эг}}$ – КПД электрогенератора.

КПД двигателя:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{1}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} (c_{\text{е.уд}}^{\text{I}} + c_{\text{е.уд}}^{\text{II}})} = 28,3 \, \%.$$

КПД электрический:

$$\eta_{\text{эл}} = \eta_{\text{ц}} \eta_{\text{эг}} = 27,8 \, \%.$$

Также в результате расчёта получено, что свободная турбина является двухступенчатой.

Введение камеры подогрева снижает КПД установки, но это действие оправдано тем, что подогрев потока позволяет существенно повысить полезную мощность двигателя. Для наглядности выполнен расчёт рассматриваемой установки, в которой отсутствует камера подогрева, и смешение потоков обоих контуров происходит в камере смешения ($\sigma_{\text{см}} = 0,87$).

Если же пойти путём переработки конструкции турбокомпрессора – «срезать» лопатки вентилятора наружного контура и доработать турбину вентилятора, а затем подключить такой модуль к вновь разработанной свободной турбине привода электрогенератора [18], то такой одноконтурный двигатель при том же режиме работы будет иметь повышенный КПД, но существенно меньшую мощность по сравнению с двухконтурным двигателем, у которого осуществляется подогрев воздуха 2-го контура.

Результаты расчёта одноконтурного двигателя и двухконтурного двигателя без камеры подогрева для сравнения с параметрами двухконтурного двигателя с камерой подогрева представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры одноконтурного, двухконтурного без и с камерой подогрева двигателей

Параметр	Размерность	Величина		
		без КП	с КП	I конт.
Температура воздуха во 2-м контуре	К	402		–
Температура газа перед ТС $T_{\text{твл}}^*$ (для случая без КП - температура смеси $T_{\text{см}}^*$)	К	654	967	1098
Температура газа после ТС $T_{\text{тс}}^*$	К	541	782	783
Степень понижения давления в ТС $\pi_{\text{тс}}$	–	2,44	2,78	4,9
Удельная работа ТС $L_{\text{тс}}$	кДж/кг	120	213,6	367,3
Удельная полезная мощность ТС, отнесённая к расходу через 1-й контур $N_{\text{е.уд}}^{G_I}$	кДж/кг	283,8	509,2	307,1
Полезная мощность двигателя N_e	МВт	43,8	78,5	57,3
Удельный расход топлива двигателя $c_{\text{е.уд}}$	кг/(кВт час)	0,276	0,296	0,211
КПД двигателя $\eta_{\text{ц}}$	%	30,3	28,3	39,7

Таким образом, в рассматриваемой энергетической установке для выработки пиковой электроэнергии введение камеры подогрева вполне оправдано. В случае работы трёх выше приведённых установок на постоянном режиме при имеющихся значениях температур газа на выходе из силовой турбины возможно использование когенерации теплоты уходящих газов [19] для повышения эффективности всей установки. Когенерация теплоты может заключаться как в подогреве воды или воздуха через теплообменные аппараты [20] для систем отопления [21] так и в её утилизации при помощи замкнутой газотурбинной [22] или паротурбинной установки.

Температура газа перед турбиной обладает достаточно высоким значением 1530 К, несмотря на снижение на 100 К, поэтому конверсированный двигатель обладает относительно малым сроком службы. Напротив, свободная турбина обладает бóльшим сроком службы и поэтому отсутствует необходимость в изготовлении для каждого конверсированного двигателя (одной модели) по свободной турбине. Таким образом, для использования некоторого количества установок необходимо меньшее количество свободных турбин.

По параметрам на выходе из свободной турбины найдена величина нормального напряжения, возникающего от центробежной силы в корне лопатки [23]: $n = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{л}}}{k_n * F_{\text{т}}}}$, где $\sigma_{\text{л}}$ – нормальное напряжение, возникающее от центробежной силы в корне лопатки; k_n – поправочный коэффициент, учитывающий геометрию лопатки по её высоте; $F_{\text{т}}$ – площадь ометаемая выходными кромками рабочих лопаток последней ступени. Последняя величина определена из уравнения расхода: $F_{\text{т}} = \frac{G_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}} * c_{\text{т}}}$, где $G_{\text{т}}$ – расход газа; $\rho_{\text{т}}$ – плотность газа; $c_{\text{т}}$ – скорость потока газа. Из уравнения состояния определена $\rho_{\text{т}}$: $\rho_{\text{т}} = \frac{P_{\text{т}}}{R_{\text{г}} * T_{\text{т}}}$, где $P_{\text{т}}$ – давление газа; $R_{\text{г}}$ – газовая постоянная продуктов сгорания; $T_{\text{т}}$ – температура газа.

При принятой частоте вращения ротора свободной турбины $n = 3000$ об/мин нормальное напряжение составляет $\sigma_{\text{л}} = 230$ МПа. Другие виды напряжений, действующих на лопатки в процессе работы, составляют не более 5 % от нормального напряжения [24], следовательно, максимальное суммарное напряжение в корне рабочей лопатки свободной турбины не превышает 242 МПа. Материал для лопаток свободной турбины [25,26] подбирается с учётом коэффициента запаса $n_{\text{зап}} = 1,2$ – то есть рассчитанный на напряжение 290 МПа. Для значений температуры стенки лопатки около 1000 К и напряжения 242 МПа возможно создать турбину со сроком службы свыше 30000 часов [27].

Заключение

В работе рассмотрена конверсия трёхвального ТРДДФ, отработавшего нормативный срок службы и прошедшего капитальный ремонт, в установку для выработки пиковой электроэнергии.

Приспособление авиационных двигателей под выработку электроэнергии актуально в рамках программы по специальному освоению северных территорий России и позволяет с минимальными техническими доработками и за короткий срок приспособить модуль авиационного двигателя в состав энергетической установки. Для этого следует провести ряд технических мероприятий:

1. Демонтаж блока сопел двигателя и форсажной камеры;
2. Установка камеры подогрева на выходе из внешнего контура;
3. Установка свободной турбины, рассчитанной на частоту равную частоте генератора;
4. Присоединение диффузора с выхлопным устройством к свободной турбине;
5. Соединение выходного вала свободной турбины с валом генератора при помощи муфты.

В результате расчёте параметров трехвального двухконтурного газогенератора в составе с камерой подогрева и свободной турбиной были получены значения, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчёта параметров трехвального двухконтурного двигателя с камерой подогрева и свободной турбиной

Параметр	Размерность	Величина
Температура газа перед турбиной	К	1530
Степень повышения полного давления	—	25,4
Степень двухконтурности	—	1,36
Температура воздуха на входе в камеру подогрева	К	402
Температура газа после турбины вентилятора	К	967
Температура газа после свободной турбины	К	782
Степень понижения давления в свободной турбине	кг/(кВт час)	2,78
Удельная работа силовой турбины	кДж/кг	213,6
Удельная полезная мощность установки, отнесённая к 1 кг воздуха 1-го контура	кДж/кг	509,2
Суммарный удельный расход топлива двигателя	кг/(кВт час)	0,296
Полезная мощность двигателя	МВт	78,5
Электрическая мощность установки	МВт	77,3
КПД двигателя	—	28,3
КПД электрический	—	27,8

В работе показано, что использование камеры подогрева в установке для выработки пиковой электроэнергии вполне оправдано, так как позволяет существенно повысить пиковую мощность двигателя (с 43,8 МВт до 78,5 МВт).

Следуя из оценки напряжения в корне рабочей лопатки с учётом температуры её стенки, сделан вывод о возможности создания силовой турбины со сроком службы свыше 30000 часов.

Список литературы

1. Арбеков А.Н. Автономная долгоресурсная малообслуживаемая замкнутая газотурбинная установка, работающая на органическом топливе // Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2012. № 3-2(34). Спец. вып. С. 307-312.
2. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/359008.html> (дата обращения 20.12.2016).
3. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки параллельной схемы // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4. № 7. С. 326–331.
4. Моляков В.Д., Осипов М.И., Сыромятникова Л.И., Тумашев Р.З. Метод расчета и анализ режимов работы многовальных газотурбинных двигателей усовершенствованных циклов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 4(73). С. 3-24.
5. Арбеков А.Н., Вараксин А.Ю., Иноземцев А.А. Влияние степени двухконтурности базового турбореактивного двигателя на возможность создания конверсионных тригенерационных двухконтурных энергетических установок // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 6. С. 928-933. DOI: [10.7868/S0040364415050026](https://doi.org/10.7868/S0040364415050026)
6. Манушин Э.А., Бирюков В.В. Паротурбинная установка геотермальной электростанции бинарного цикла для геотермальных месторождений Камчатского края // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 9. С. 1-8. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/220323.html> (дата обращения 30.01.2017).
7. Моляков В.Д., Тумашев Р.З. Обоснование схем и параметров высокоэффективных газотурбинных установок для малой энергетики // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. №. 10. С. 52-58. DOI: [10.18698/0536-1044-2012-10](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2012-10)
8. Тумашев Р.З., Моляков В.Д., Лаврентьев Ю.Л. Повышение эффективности компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. №. 1(94). С. 68-79.
9. Шпилевой В.А., Закирзаков А.Г. Сопоставление электрического и газотурбинного типов привода насосных станций магистральных нефтепроводов // Успехи современного естествознания. 2016. № 6. С. 202-206.
10. Shpilevoy V.A., Chekardovsky S.M., Zakirazkov A.G. A mathematical model of gas-turbine pump complex // Intern. Scientific-Practical Conf. of students, graduate students and young scientists "Transport and storage of hydrocarbons" (Tyumen, Russia, 20-25 May 2016): Proc. Bristol: IoP, 2016. P. 012009. DOI: [10.1088/1757-899X/154/1/012009](https://doi.org/10.1088/1757-899X/154/1/012009)

11. Abbas H.F., Wan Daud W.M.A. Hydrogen production by methane decomposition: A review // Intern. J. of Hydrogen Energy. 2010. Vol. 35. Iss. 3. Pp. 1160-1190. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.11.036](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.036)
12. Чернова Н.И., Киселева С.В., Попель О.С. Эффективность производства биодизеля из микроводорослей // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 14-21. DOI: [10.1134/S0040363614060010](https://doi.org/10.1134/S0040363614060010)
13. Михальцев В.Е., Моляков В.Д., Тумашев Р.З. Полузамкнутая газотурбинная установка на твёрдых горючих // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1999. № 1 (34). С. 75-84.
14. Иванов В.Л. Газотурбинный энергопреобразователь для установки утилизации твердых бытовых и промышленных отходов методом газификации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. Спец. вып. № 7. С. 134-144.
15. Данилова С.К., Тумашев Р.З. Энерготехнологическая установка на базе газотурбинного двигателя с использованием продуктов газификации древесных отходов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 4. С. 1-13. DOI: [10.7463/aplts.0416.0846815](https://doi.org/10.7463/aplts.0416.0846815)
16. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Расчёт параметров цикла при проектировании газотурбинных двигателей и комбинированных установок: учеб. пособие / под ред. И.Г. Суровцева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 60 с.
17. Зрелов В.А. Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2005. 336 с.
18. Моляков В.Д., Куникеев Б.А. Особенности проектирования эффективных турбин с учетом влияния радиального зазора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 9 (654). С. 9-18. DOI: [10.18698/0536-1044-2014-9-9-18](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-9-18)
19. Тумашев Р.З., Михеев С.С., Куникеев Б.А. Производство электроэнергии на компрессорных станциях утилизационными газотурбинными установками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. №. 1 (106). С. 44-53. DOI: [10.18698/0236-3941-2016-1-44-53](https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-1-44-53)
20. Шафиков Г.А. Интенсификация теплоотдачи при помощи лунок и накатки на поверхности теплообмена // Молодёжный научно-технический вестник. 2015. № 4. С. 14.
21. Клименко А.В., Агабабов В.С., Ильина И.П., Рожнатовский В.Д., Бурмакина А.В. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 36-43. DOI: [10.1134/S0040363616060047](https://doi.org/10.1134/S0040363616060047)
22. Шафиков Г. А. Влияние состава рабочего тела на объём теплообменных аппаратов замкнутой газотурбинной установки // Машины и установки: проектирование, разработка, эксплуатация. 2016. № 2. С. 25-37. DOI: [10.7463/aplts.0216.0837906](https://doi.org/10.7463/aplts.0216.0837906)
23. Манушин Э.А., Суровцев И.Г. Конструирование и расчёт на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок. М.: Машиностроение, 1990. 399 с.

24. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок / Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 591 с.
25. Сулима А.М., Носков А.А., Серебренников Г.З. Основы технологии производства газотурбинных двигателей. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1996. 480 с.
26. Справочник по конструкционным материалам / Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., Герасимов С.А. и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 636 с.
27. Клауч Д.Н., Овсеенко А.А., Овумян Г.Г., Кущева М.Е., Щегольков Н.Н., Кудинов А.А. Технологические методы повышения качества изготовления и ресурса работы турбинных лопаток // Вестник Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2008. №. 4. С. 49-53.

Conversion of Aircraft Dual-flow Turbojet into Peak Power Plant

G.A. Shafikov^{1,*}, V.D. Molyakov¹

^{*}88347@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: the conversion of engine, turbfan engine with afterburner, peak electricity, independent power plant

The paper is aimed at considering the aircraft engine conversion into peak or short-used energy unit, which is relevant for the task of developing the northern regions of the Russian Federation. The three-shaft turbojet engine with a twelve-stage compressor and a four-stage turbine is adopted as an aircraft engine under consideration. The afterburner with a block of jet nozzles is removed from the gas generator module, and a heating chamber is set at the outlet of the bypass duct to raise electric power of engine and not complicate the construction by the presence of a mixing chamber. In addition, the heating chamber serves to equalize the total pressure and flow temperature in the section before the free turbine and allows the use of a short adapter between the gas generator module and the free turbine, which reduces the loss of total pressure. Then a free turbine and a diffuser with an exhaust device are installed. The output shaft of the power turbine is connected by means of a coupling to an alternating current (a. c.) generator or other special load.

To find the parameters of the plant, a calculation was made in which the initial data were taken, namely a gas temperature in front of the turbine of 1530 K (the gas temperature in front of the turbine is reduced by 100 K in order to prolong the engine life; therefore, the gas temperature before the turbine was 1630 K); air flow of 364 kg/s; bypass ratio of 1.36 (the ratio of the air flow passing through the bypass duct to the air flow entering the core). As a result, it consumes 0.296 kg / (kWh) (fuel-aviation kerosene) and a power capacity of 78.5 MW. For the received value of capacity the T3ΦΠ-80-2Y3 a. c. electric generator has been chosen as the load. As a result, the power plant, equipped with a converted engine and electric generator, has an electric power of 77.3 MW and an efficiency of 27.8%.

To assess the effect of introduced preheating chamber on the parameters of the gas turbine engine, a calculation was performed with no heating chamber, and it was obtained that the introduction of a heating chamber in the bypass duct to heat the bypass duct airflow from 402 K to 967 K, reduces the engine efficiency by 2%, but increases its power by 79% - from 43.8 MW to 78.5 MW.

Due to the sufficiently high gas temperature, the converted engine has a relatively short lifetime. On the contrary, the free turbine has a longer life, and therefore there is no need to manufacture a free turbine for each converted engine. For an approximate evaluation of the free turbine life before the overhaul of the engine hot section, the maximum stress at the root of the working blade was calculated. For temperature values of 1000 K and stress of 242 MPa it is possible to create a turbine with a lifetime of over 30,000 hours.

Reference

1. Arbekov A.N. Off-line long-life unservice close gas organic fuel-powered turbine. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2012, no. 3-2(34), spec. iss., pp. 307-312 (in Russian).
2. Arbekov A.N., Burtsev S.A. Research of the working cycle of a closed gas turbine in a tri-generation unit operating on a sequential scheme. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2012, № 3. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/359008.html>, accessed 20.12.2016 (in Russian).
3. Arbekov A.N., Burtsev S.A. Research of closed gas turbine cycle of a trigeneration unit operating on parallel schema. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2012, vol. 4, № 7, pp. 326-331 (in Russian).
4. Moliakov V.D., Osipov M.I., Syromiatnikova L.I., Tumashev R.Z. Calculation method and operation mode analysis of multishaft gas turbine engines with modernized cycles. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye* [Herald of the Bauman MSTU. Mechanical Engineering], 2008, № 4(73), pp. 3-24. (in Russian).
5. Arbekov A.N., Varaksin A.Yu., Inozemtsev A. A. Influence of the by-pass ratio of a basic turbofan engine on the possibility of creating aeroderivative trigeneration power plants. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 899-903. DOI: [10.1134/S0018151X15050028](https://doi.org/10.1134/S0018151X15050028)
6. Manushin E.A., Biryukov V.V. Geothermal power plants steam turbine with binary cycle for geothermal fields of Kamchatka. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 9, pp. 1-8. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/220323.html>, accessed 30.01.2017 (in Russian).
7. Molyakov V.D., Tumashev R.Z. Justification of layouts and parameters of high-performance gas turbine units for small power. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 10, pp. 52-58. DOI: [10.18698/0536-1044-2012-10](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2012-10) (in Russian)
8. Tumashev R.Z., Molyakov V.D., Lavrent'ev Yu.L. Increasing the efficiency of compressor stations at main gas pipelines. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroyeniye* [Herald of the Bauman MSTU. Mechanical Engineering], 2014, no. 1 (94), pp. 68-79 (in Russian).

9. Shpilevoy V.A., Zakirzakov A.G. Comparison of electric and gas turbine types drive pumping stations of main oil pipelines. *Uspekhi sovremennogo estestvoznania* [Advances in Current Natural sciences], 2016, no. 6, pp. 202-206 (in Russian).
10. Shpilevoy V.A., Chekardovsky S.M., Zakirzakov A.G. A mathematical model of gas-turbine pump complex. *Intern. Scientific-Practical Conf. of students, graduate students and young scientists "Transport and storage of hydrocarbons"* (Tyumen, Russia, 20-25 May 2016): Proc. Bristol: IoP, 2016. P. 012009. DOI: [10.1088/1757-899X/154/1/012009](https://doi.org/10.1088/1757-899X/154/1/012009)
11. Abbas H.F., Wan Daud W.M.A. Hydrogen production by methane decomposition: A review. *Intern. J. of Hydrogen Energy*, 2010, vol. 35, no. 3, pp. 1160-1190. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2009.11.036](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.036)
12. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel' O.S. Efficiency of the biodiesel production from microalgae. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 399-405. DOI: [10.1134/S0040601514060019](https://doi.org/10.1134/S0040601514060019)
13. Mikhaltsev V.E., Molyakov V.D., Tumashev R.Z. Semi-closed gas-turbine plant on solid fuels. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Mechanical Engineering], 1999, no. 1 (34), pp. 75-84. (in Russian).
14. Ivanov V.L. Gas- turbine energy-transducer for a solid domestic and industrial waste recycling plant by gasification. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Mechanical Engineering], 2012, spec. iss. 7, pp. 134-144 (in Russian).
15. Danilova S.K., Tumashev R.Z. The Gas turbine engine-based power technology plant using wood waste gasification products. *Mashiny i ustanovki: Proektirovanie, ustanovka i ekspluatatsiia* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2016, no. 4, pp. 1-13. DOI: [10.7463/aplts.0416.0846815](https://doi.org/10.7463/aplts.0416.0846815) (in Russian)
16. Mikhaltsev V.E., Molyakov V.D. *Raschet parametrov tsikla pri proektirovanii gazoturbinnnykh dvigatelej i kombinirovannykh ustanovok* [Calculation of the cycle parameters in the design of gas turbine engines and combined plants] / Ed. by I.G. Surovtsev. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2014. 60 p. (in Russian).
17. Zrelov V.A. *Otechestvennye gazoturbinnnye dvigateli. Osnovnye parametry i konstruktivnye skhemy* [Domestic gas turbine engines. Basic parameters and constructive schemes]: textbook. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 336 p. (in Russian).
18. Molyakov V.D., Kunikeev B.A. Designing efficient turbines taking into account radial clearance. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2014, no. 9 (654), pp. 9 - 18. DOI: [10.18698/0536-1044-2014-9-9-18](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-9-18) (in Russian)
19. Tumashev R.Z., Mikheev S.S., Kunikeev B.A. Electric energy generation at compressor stations using gas-turbine heat recovery plants. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Mechanical Engineering], 2016, no. 1 (106), pp. 44-53. DOI: [10.18698/0236-3941-2016-1-44-53](https://doi.org/10.18698/0236-3941-2016-1-44-53) (in Russian)

20. Shafikov G.A. Intensification of heat transfer by means of holes and knurling on the surface of heat exchange. *Molodezhnyj nauchno-tekhnicheskij vestnik* [Youth scientific and technical bulletin], 2015, no. 4, p. 14 (in Russian).
21. Klimenko A.V., Agababov V.S., Il'ina I.P., Rozhnatovskii V.D., Burmakina A.V. Layouts of trigeneration plants for centralized power supply. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 6, pp. 414–421. DOI: [10.1134/S0040601516060045](https://doi.org/10.1134/S0040601516060045)
22. Shafikov G.A. Fluid composition impact on heat exchangers volume of closed-cycle gas turbine plant. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiia* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2016, № 2, pp. 25-37.
DOI: [10.7463/aplts.0216.0837906](https://doi.org/10.7463/aplts.0216.0837906) (in Russian)
23. Manushin E.A., Surovtsev I.G. *Konstruirovaniye i raschet na prochnost' turbomashin gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Design and calculation of the strength of turbomachines of gas turbine and combined plants]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 399 p. (in Russian).
24. *Teploobmennyye apparaty i sistemy okhlazhdeniya gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Heat exchanging devices and cooling systems for gas turbine and combined plants] / Ivanov V.L., Leontiev A.I., Manushin E.A., Osipov M.I. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2003. 591 p. (in Russian).
25. Sulima A.M., Noskov A.A., Serebrennikov G.Z. *Osnovy tekhnologii proizvodstva gazoturbinnnykh dvigatelej* [Fundamentals of technology for the production of gas turbine engines]. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1996. 480 p. (in Russian).
26. *Spravochnik po konstruktivnym materialam* [Handbook of structural materials] / Arzamasov B.N., Solov'eva T.V., Gerasimov S.A. a.o. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2005. 636 p. (in Russian).
27. Klauch D.N., Ovseenko A.N., Ovumyan, G.G., Kuscheva M.E., Schegol'kov N.N., Kudinov A.A. Technological methods for improving the quality of workmanship and the service life of turbine blades. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 4, pp. 49-53 (in Russian).